

光机集成仿真前处理中点云边界检测技术

徐广州^{1,2}, 阮萍¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为解决通用光机集成仿真实接口中光学面形点云数据处理问题, 提出了基于点云边界检测技术的面形数据前处理方法。首先讨论了集成仿真面形数据前处理方法及边界检测技术在前处理中作用; 然后研究了边界检测算法涉及的光学面形点云数据组织, 面形节点 K 邻域微切平面的拟合算法以及边界节点的判断方法。在点云边界检测算法研究基础上, 讨论了算法主要数据结构和程序实现, 并通过示例面形点云边界提取验证了算法的正确性和有效性, 为光机集成仿真面形数据处理算法提供了新的技术参考。

关键词: 点云边界; 光机集成仿真; 前处理; K 邻域

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0428001

Point cloud boundary detection in preprocessor of optical-mechanical integrated simulation

Xu Guangzhou^{1,2}, Ruan Ping¹

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To resolve the data processing problem of point cloud for optical surface in general interface of optical-mechanical integrated simulation, the surface data processing method based on point cloud boundary detection was presented. First, the surface data preprocessing method in integrated simulation was discussed and effect of boundary detection in surface preprocessing data was also referred. Then, boundary detection algorithm referring to several techniques was researched including the data organization of point cloud, the small tangential plane fitting algorithm of the K-nearest neighbor node and the judgment of boundary node. Based on the research of point cloud boundary detection algorithm, the primary data structure and the program realization was discussed and by the extraction of demonstrated surface point cloud, the algorithm of boundary detection was proved to be right and effective. The algorithm of boundary detection provides the new technical reference for data process of optical surface.

Key words: point cloud boundary; optical-mechanical integrated simulation; preprocessor; K-nearest neighbor

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(U1231204, 51405387)

作者简介: 徐广州(1980-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事光学有效载荷光机集成仿真技术方面的研究。Email: xgz_buaa@163.com

导师简介: 阮萍(1967-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光学精密仪器研制方面的研究。Email: ruanp@opt.ac.cn

0 引言

点云是缺乏明显拓扑几何关系的空间数据点的集合,可以通过测量仪器获取,在逆向工程中获得广泛使用。点云边界是指能够表达实物样件原始边界特征的测量点,或由测量点构成的曲线,边界作为表达曲面的重要几何特征和求解曲面的定义域,对后续数据处理起着重要作用^[1]。随着有限元及网格离散技术的发展,通过对模型的网格离散,也将获得由节点组成的空间分布点云数据。

对光学仪器进行光机热集成仿真时,需要对仪器包含镜体进行有限元离散,然后拟合镜面面形,拟合之后的面形数据可以直接导入光学分析程序中,实现设备在热、力等外载作用下对光学性能影响的评价。光机热集成仿真技术的研究多集中在面形拟合算法上^[2-3],而对于光学镜面前处理技术却鲜有人研究,文中尝试给出了基于点云边界检测技术的波面拟合数据处理方法及其在光机集成仿真中的应用研究;另外,点云边界提取算法多数应用于逆向工程领域^[4],未有文献将点云边界的检测算法扩展到光学仪器集成仿真和光学面形点云数据处理中。尽管光学面形几何边界是确定的,面形离散时也可通过控制网格离散方法得到某种规律性分布的点云数据,但处理过程中几何特征可能未知,网格离散控制增加了面形网格离散限制,影响了点云数据处理效率,降低了所开发光机接口程序的通用性;如何自动且高效的获取圆形孔径或任意孔径镜体的面形点云边界是需要关注的问题,在光学仪器集成仿真领域也有重要应用,它也是通用光机热集成仿真实接口程序开发面形数据处理模块中重要算法之一。

鉴于光机集成仿真面形数据处理技术研究现状和工程需求,文中将对有限元分析所得镜面点云数据边界提取算法及其在光机热集成仿真前处理中的应用进行研究。

1 集成仿真前处理方法

光机集成仿真通用接口的关键是处理光学面形在力、热等外载下的面形数据,并基于某多项式拟合面形位移数据^[5],常用多项式包括 Zernike 圆多项式、Zernike 环带多项式等,上述多项式的拟合通常在圆

形孔径上进行,需要面形中心节点和半径数据,此部分工作在通用接口程序开发中,可由专门的数据处理模块完成,类比有限元分析网格生成前处理模块,可将此数据处理模块定义为前处理模块。前处理模块在光机集成仿真中起到对读取的面形点云数据进行处理,提供集成仿真面形拟合需要的基础数据,如面形矢高方向、归一化中心数据等信息,它是通用集成仿真实接口开发中的重要模块。

Zernike 圆多项式通常在单位圆上才能使用,需要获取面形半径及中心坐标数据,将面形进行归一化处理,在通用接口开发中通过前处理模块自动识别归一化半径和中心坐标,为减小计算量,通常不会遍历全部点云数据,而通过点云边界就可以获得归一化所需的基础数据;尽管 Zernike 圆多项式在拟合非圆形孔径面形时多项式各项由于失去正交性,使所求系数间存在耦合关系,不能准确的表达各项间的物理含义,但 Zernike 多项式拟合仍有工程应用价值,非圆形平面镜使用 Zernike 圆多项式拟合时可以用非圆形孔径最小外接圆的圆心作为参考点进行,如图 1 所示,最小外接圆可以使用点云边界点通过特定算法获得。

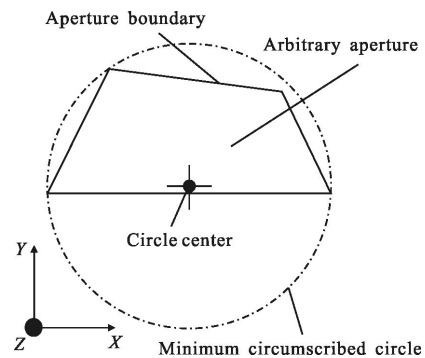


图 1 任意平面孔径最小外接圆

Fig.1 Minimum circumscribed circle of arbitrary plane aperture

点云边界检测算法在集成仿真前处理中作用可归结为:

(1) 光学面形类型识别,平面还是球面(非球面)。平面与球面(非球面)在拟合算法、矢高方程描述、面形 PV 及 RMS 计算方法不同。

(2) 球面(非球面)半径符号识别,符合几何光学中的半径符号习惯定义规则。通常面形点云输出坐标系与 CAD 模型坐标系一致,通过点云边界数据通

过算法识别半径正负, 将带符号半径输入矢高方程描述光学面形。

(3) 圆形孔径平面或球面(非球面)的归一化半径及中心识别。通过边界节点数据可以自动识别光学镜面半径, 为面形数据归一化提供基础数据。

(4) 任意平面孔径的 Zernike 圆多项式拟合, 通过点云边界得到任意面形孔径的最小外接圆作为圆形孔径进行拟合。

集成仿真前处理模块是光机集成仿真接口模块, 点云边界检测技术是光机集成仿真数据前处理技术中重要算法, 在通用光机集成仿真接口开发中有重要应用。

2 面形点云边界检测技术

光学面形点云边界检测是较为复杂的算法过程, 组织缺乏空间拓扑关系点云数据并识别面形点云边界主要涉及到点云数据的组织、K 邻域微切平面拟合、微切平面内点云投影数据的边界点识别等。

2.1 点云数据组织

将无任何空间拓扑关系的镜面点云数据组织成便于算法检索和实现的数据形式, 是需要关注的问题。考虑到计算机图形学涉及图形的计算、处理和显示等相关方法, 可以使用计算图形学中包含的包围盒方法来组织点云数据, 所谓包围盒即在点云坐标系下, 包含所有点云的长方体, 它由点云在三个坐标方向的相应节点的最大坐标值减最小坐标值得到, 包围盒在坐标方向的长度为:

$$\begin{cases} L_x = X_{\max} - X_{\min} \\ L_y = Y_{\max} - Y_{\min} \\ L_z = Z_{\max} - Z_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

包围盒体积为: $V = L_x L_y L_z$ 将包围盒在三个坐标方向进行分割, 可以将包围盒分割的子网格定义为栅格。栅格边长的选择与点云密度相关, 若节点数目为 N 且点云中节点均匀分布, 则栅格边长可取为: $L_s = \sqrt[3]{V/N}$, 包围盒分割为栅格数目为 $D \times E \times F$, 其中:

$$\begin{cases} D = \text{Ceil}(L_x/L_s) \\ E = \text{Ceil}(L_y/L_s) \\ F = \text{Ceil}(L_z/L_s) \end{cases} \quad (2)$$

Ceil 表示向上取整。

由于点云中节点生成时的随机性, 不具备均匀

性分布特点, 为了使每个栅格中的节点数目尽可能分布均匀, 可以统计非空栅格的数目 N_{has} , 然后计算点云密度, 基于点云密度重新计算栅格边长, 具体方法为: 点云密度 $\rho = N/(N_{\text{has}} \times L_s^3)$, 基于点云密度和点邻域数目 K , 得到更新之后的栅格边长为: $L_r = \beta \times \sqrt[3]{(K/\rho)}$, 其中 β 为修正系数, 可以根据点云的分布特点进行栅格边长的修正, 修正原则为: 点云密度越大, 栅格边长越小, β 取值范围为 $0 < \beta < 1$; 点云密度越小, 栅格边长越大, β 取值范围为 $\beta > 1$ 。

在对光学镜面点云组织实现, 可以得到基于点云密度方法得到的栅格边长近似等于面形有限元网格划分时指定的单元长度; 基于更新后栅格边长 L_r , 重新得到包围盒在三轴向分割后的栅格数目 $D_r \times E_r \times F_r$ 。对于点云中任意一点 $P(X, Y, Z)$, 对应的栅格在坐标轴上编号 I, J, K 为:

$$\begin{cases} I = \text{Floor}(X - X_{\min})/L_r \\ J = \text{Floor}(Y - Y_{\min})/L_r \\ K = \text{Floor}(Z - Z_{\min})/L_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: Floor 表示向下取整, 若采用一维数组存储, 节点对应的栅格编号为: $I \times E_r \times F_r + J \times F_r \times K$ 。

2.2 节点 K 邻域点集微切平面拟合

为了判断某节点是否为边界点, 通常不会将此点与除其之外的其余全部节点来进行比较判断, 而通过此节点及其 K 邻域点进行, 节点的 K 邻域为与某节点距离较近的 K 个节点组成的点集, 通常由小到大进行排列。

某点及其 K 邻域点集对应的微切平面可以使用最小二乘法拟合获得, 但参考文献[6]中尽管得到了正确的协方差矩阵, 由于带约束条件最优化问题的数学描述不正确, 导致其推导公式(4)存在错误; 参考文献[7-8]中使用最小二乘法拟合平面时, 由于假设平面方程中 z 分量系数 $C \neq 0$, 并使用 x, y 分量描述 z 分量, 此种假设使平面方程不具备一般性, 实践证明上述平面表达方法会导致点云边界提取不准确的问题。鉴于文献中平面拟合方法存在的问题, 文中给出了拟合空间散乱点云得到其微切平面通用性数学方法, 算法也适用于平面镜在外载作用下面形均方根的计算。

不失一般性, 节点 K 邻域微切平面方程可设为: $Ax + By + Cz + D = 0$, 其中, 平面的单位法向量为

$N(A, B, C)$ 。设节点 K 邻域内任意点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 与微切平面的距离为 Dist_i , $\text{Dist}_i = |Ax_i + By_i + Cz_i + D|$, 节点 K 邻域点集为 $P_i(i=1, 2, \dots, k)$ 。根据最小二乘法原理, 要获得 K 邻域点集的最佳拟合平面, 需要满足:

$$\begin{cases} \text{Min}FF(A, B, C, D) = \sum_{i=1}^k (Ax_i + By_i + Cz_i + D)^2 \\ A^2 + B^2 + C^2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

由带约束条件的优化设计问题的求解方法, 上述问题可转换为求函数 $F(A, B, C, D)$ 的极值问题:

$$F(A, B, C, D) = FF(A, B, C, D) - \lambda(A^2 + B^2 + C^2) \quad (5)$$

由 $\frac{\partial F(A, B, C, D)}{\partial D} = 0$, 得:

$$D = -(Ax_n + By_n + Cz_n)$$

其中

$$\begin{cases} x_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \\ y_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \\ z_n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_i \end{cases} \quad (6)$$

$$F(A, B, C, D) = \sum_{i=1}^k [A(x_i - x_n) + B(y_i - y_n) + C(z_i - z_n)]^2 - \lambda(A^2 + B^2 + C^2) \quad (7)$$

令

$$\begin{cases} \Delta x_i = x_i - x_n \\ \Delta y_i = y_i - y_n \\ \Delta z_i = z_i - z_n \end{cases} \quad (8)$$

由 $\frac{\partial F}{\partial A} = 0, \frac{\partial F}{\partial B} = 0, \frac{\partial F}{\partial C} = 0$, 并记为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^k (\Delta x_i \Delta x_i) & \sum_{i=1}^k (\Delta x_i \Delta y_i) & \sum_{i=1}^k (\Delta x_i \Delta z_i) \\ \sum_{i=1}^k (\Delta x_i \Delta y_i) & \sum_{i=1}^k (\Delta y_i \Delta y_i) & \sum_{i=1}^k (\Delta y_i \Delta z_i) \\ \sum_{i=1}^k (\Delta x_i \Delta z_i) & \sum_{i=1}^k (\Delta y_i \Delta z_i) & \sum_{i=1}^k (\Delta z_i \Delta z_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (9)$$

将上式记为: $MX = \lambda X$ 。

因为 $A^2 + B^2 + C^2 = 1$, 对应内积 $(X, X) = 1$, 则 $MX = \lambda X$, 对应内积 $(MX, X) = (\lambda X, X)$, 得:

$$\lambda = (MX, X) = \sum_{i=1}^k [A\Delta x_i + B\Delta y_i + C\Delta z_i]^2 \quad (10)$$

通过上述推导过程可以看出, 求解微切平面方程问题转换为求解协方差矩阵 M 的最小特征值及

其对应的特征向量问题, 并且最小特征值对应的特征向量即为微切平面方程的单位法矢 $N(A, B, C)$ 。求出微切平面后, K 邻域内任意点 $P(x_i, y_i, z_i)$ 在微切平面内的投影点为 $P'(x_i', y_i', z_i')$, 其坐标分量应满足:

$$\begin{cases} (x_i' - x_i)/A = (y_i' - y_i)/B = (z_i' - z_i)/C \\ Ax_i' + By_i' + Cz_i' + D = 0 \\ A^2 + B^2 + C^2 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

解得:

$$\begin{cases} x_i' = (B^2 + C^2)x_i - AB y_i - AC z_i - AD \\ y_i' = -AB x_i + (A^2 + C^2)y_i - BC z_i - BD \\ z_i' = -AC x_i - BC y_i + (A^2 + B^2)z_i - CD \end{cases} \quad (12)$$

得到投影点集 $P' = \{p'(x_i', y_i', z_i') | i=1, 2, \dots, k\}$ 。

2.3 边界点识别方法

利用微切平面投影点集识别边界点的方法主要有角度法^[6]和等效合力法^[7]。实践证明等效合力法更简洁有效, 其主要思想为: 对于微切平面上投影点集内数据, 直观地认为: 数据点 p' 周围点分布如果偏向一侧, 则认为 p' 为边界特征点; 反之, 如果数据点围绕 p' 均匀分布, 则认为 p' 为内部点。以当前考察点的投影点 $p_i'(x_i', y_i', z_i')$ 为起点, $p_j'(x_j', y_j', z_j')$ 为终点, 定义向量集:

$$\{p_i', p_j'\} = \{(x_i' - x_j', y_i' - y_j', z_i' - z_j') | i, j=1, 2, \dots, k, i \neq j\}$$

并对上述向量集合进行归一化, 得到归一化后向量集 $\{p_i'', p_j''\}$ 。

归一化之后点集:

$$\{p_j''(x_j'', y_j'', z_j'') | j=1, 2, \dots, k, j \neq i\}$$

分布在以 p_i' 为圆心的单位圆上, 相当于赋予点 p_j'' 对圆心 p_i' 的单位拉力 F_{ij} , 当所有点同方向时合力最大值为 F_K , K 邻域投影点集合力计算方法如下:

$$\left| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k F_{ij} \right| = \sqrt{\left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k x_j'' \right)^2 + \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k y_j'' \right)^2 + \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k z_j'' \right)^2}$$

它与最大合力 F_K 的比值与介于 0~1 之间的阈值 ε 的比较来识别边界点, 即当 $\frac{|\sum F_{ij}|}{F_K} > \varepsilon$, 可判断当前点为边界点; 否则为内部点。阈值 ε 的选择与面形弯曲程度相关, 面形边界弯曲较大时取较小阈值, 较平坦时取较大阈值; 计算数据表明: 阈值 ε 的取值在 0.4~0.6 之间, 可得到理想结果, 提取到高精度的面形边界点。

3 边界检测算法实现

边界检测算法实现主要包括算法的数据结构和

程序流程。

3.1 数据结构

由于栅格及栅格中节点数据的存储方式影响到整个算法的复杂性,根据算法对栅格及栅格中数据操作的特点,对栅格及栅格中节点的存储采用一维数组进行存储,而不是采用链表方式,这样可以简化节点的数据结构。

采用一维数组进行存储时建议选用常用开发环境提供的一维数组泛型或模板类进行,优点在于可不指定数组长度及动态分配数组存储空间,且模板类中提供的数组中数据操作方式可以简化程序实现。

另外,考虑到数据操作的模块化和便利性,程序设计时自定义了几种数据类型,如:PointCls 为点云中节点坐标类,PointIndexNumCls 为节点在栅格中位置类,PointsKNeighborCls 为节点 K 邻域检索时存储距离类,PToPUnitVectorCls 为节点 K 邻域归一化时使用的类,上述类可封装到统一的命名空间下。PToPUnitVectorCls 类定义格式如下:

```
PToPUnitVectorCls{
    PointCls p0; //归一化参考点
    PointCls pf; //归一化目标点
    double unitvx; // pf 归一化 X 分量
    double unitvy; // pf 归一化 Y 分量
    double unitvz; // pf 归一化 Z 分量
}
```

3.2 算法流程图

光机集成仿真中,光学镜面面形点云边界节点检测算法主要过程为:

(1) 首先通过通用数据读入模块将力、热等外载作用下有限元分析后的镜面点云读入,并得到其包围盒;

(2) 将包围盒按照特定算法获得的边长进行分割,并得到栅格;

(3) 寻找边界栅格。边界栅格可由与此栅格相邻的非空栅格数目来判断,对于平面点云,若某栅格临近非空栅格数目小于 8,则此栅格为边界栅格;对于空间点云,若某栅格临近非空栅格数目小于 26,则此栅格为边界栅格;

(4) 寻找边界栅格中所有节点及其 K 邻域点集;

(5) 拟合 K 邻域点集得到微切平面及点集到微切平面的投影点集;

(6) 将投影点集与参考点进行归一化,并得到归一化后的合力,比较合力与设定阈值大小,判断某节点是否为边界节点。

程序流程如图 2 所示。

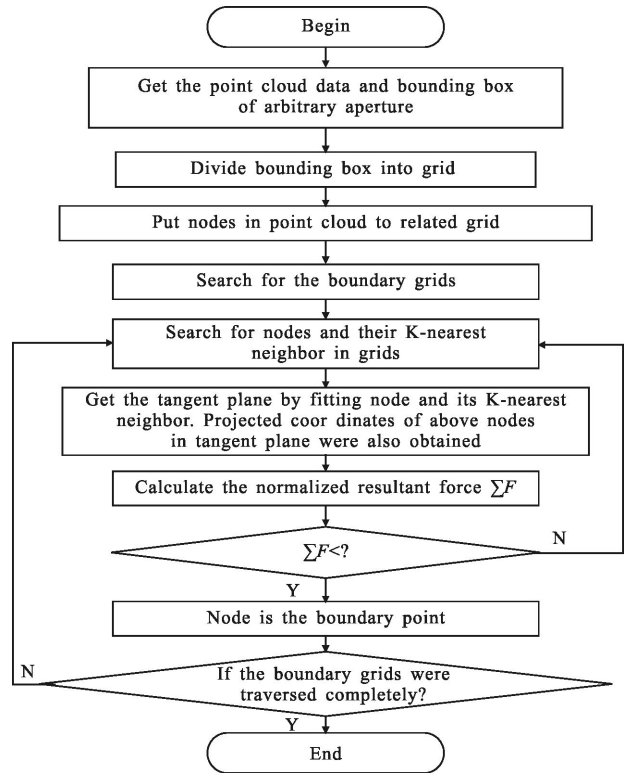


图 2 光学面形边界检测算法流程图

Fig.2 Flow chart of optical surface boundary detection algorithm

4 边界检测算法示例

为验证算法的正确性,对实际项目中光学镜面面形有限元仿真结果进行了边界点的提取。图 3 为某相关跟踪系统摆镜镜面点云及边界,图 4 为某 RC 系统大口径非球面主镜点云及边界,图 5 为某干涉仪棱镜点云及边界。

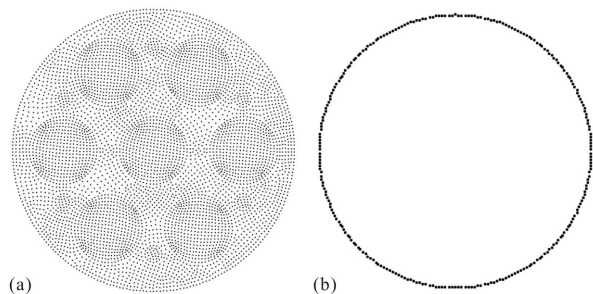


图 3 平面摆镜镜面点云及边界

Fig.3 Point cloud and boundary of plane tilt mirror

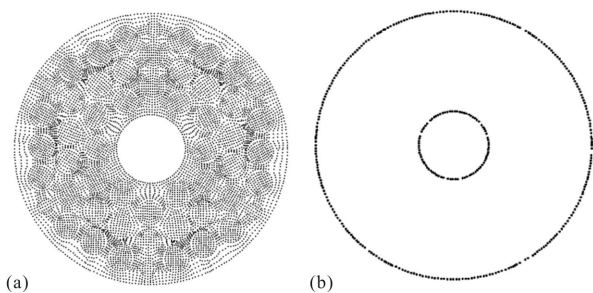


图 4 非球面主镜镜面点云及边界

Fig.4 Point cloud and boundary of aspheric primary mirror

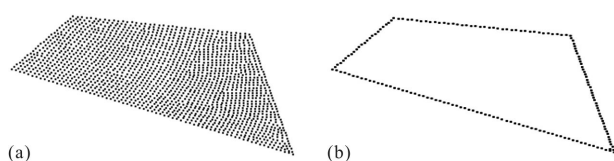


图 5 干涉棱镜某镜面点云及边界

Fig.5 Point cloud and boundary of interference prism

通过工程实例验证, 算法提取的光学镜面形点云边界准确, 并能满足整个光机接口程序实时性处理需求。目前光学面形点云边界检测算法已经在独立开发的通用光机接口程序前处理模块中进行了应用, 并取得了良好效果。

5 结论

文中尝试探讨了光机集成仿真前处理技术, 并对光机集成仿真前处理技术中面形点云边界检测算法进行了较系统研究。镜面点云边界检测算法为光机集成仿真面形拟合算法提供了基础数据, 也拓展了 Zernike 圆多项式在拟合非圆形孔径时的应用范围。通过示例光学面形点云边界提取, 验证了边界检测算法可以有效的处理有限元分析生成的镜面节点点云数据, 也证明了算法稳定性和正确性。光学镜面点云边界检测技术也为通用集成仿真接口程序开发中面形数据处理方法提供了借鉴, 具有重要工程应用价值。

参考文献:

[1] Ke Yinglin, Fan Shuqian. Research on direct extraction of boundary from point cloud [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(9): 116-120. (in Chinese)

柯映林, 范树迁. 基于点云的边界特征直接提取技术[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(9): 116-120.

[2] Yang Yi, Chen Shijin, Zhang Wei. Review of thermal-structural-optical integrated analysis of space remote sensor [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(6): 913-917. (in Chinese) 杨恽, 陈时锦, 张伟. 空间光学遥感器光机热集成分析综述[J]. *光学技术*, 2005, 31(6): 913-917.

[3] Zhang Yin, Ding Zhenmin, Zhao Huijie, et al. Rigid-body displacement separation of optics in optical-structural-thermal integrated analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2763-2767. (in Chinese) 张颖, 丁振敏, 赵慧洁, 等. 光机热集成分析中镜面刚体位移分离[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2763-2767.

[4] Sun Dianzhu, Fan Zhixian, Li Yanrui. Automatic extraction of boundary characteristics from scatter data[J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech*, 2009, 39(1): 84-86. (in Chinese) 孙殿柱, 范志先, 李延瑞. 散乱数据点云边界特征自动提取算法[J]. *华中科技大学学报*, 2009, 39(1): 84-86.

[5] Xu Guangzhou, Ruan Ping, Li Ting, et al. Surface simulation of tilt mirror based on contact and integrated simulation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1316-1322. (in Chinese) 徐广州, 阮萍, 李婷, 等. 基于接触方法与集成仿真技术的摆镜面形仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1316-1322.

[6] Liu Zhangming, Dong Huiying, Wang Jintao. Boundary extraction algorithm of point clouds on non-closed freeform surface [J]. *Journal of Computer Applications*, 2009, 29(2): 247-249. (in Chinese) 刘章明, 董慧颖, 王金涛. 一种非封闭自由曲面的点云边界提取算法[J]. *计算机应用*, 2009, 29(2): 247-249.

[7] Chen Yiren, Wang Yibin, Peng Zhangjie, et al. Improved algorithm for extraction of boundary characteristic point from scattered point cloud [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(23): 177-180. (in Chinese) 陈义仁, 王一宾, 彭张节, 等. 一种改进的散乱点云边界特征点提取算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(23): 177-180.

[8] Zhang Junqiang, Dong Deyi, Wu Qingwen, et al. Treatment of surface figure error and rigid body motion for mirror/lens in optical remote sensor [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2011, 32(6): 242-247. (in Chinese) 张军强, 董得义, 吴清文, 等. 光学遥感器镜面面形误差及刚体位移处理方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 242-247.